УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-12-21

Научная статья

Технология пост-напряженного армирования железобетонных конструкций

Д. И. Борисов ✉, **М. В. Семенов**, **М. В. Письменсков**, **В. Н. Аксенов**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ borisovdionisij@gmail.com

Аннотация

Введение. При строительстве зданий и сооружений используют большое количество строительных материалов, одним из таких материалов является железобетон. Он занимает лидирующее место при выборе материала для возведения зданий и сооружений. Однако, как и у любого другого материала, у железобетона имеются недостатки: помимо значительного веса железобетонных конструкций к недостаткам можно отнести невозможность перекрывать им большие пролеты, так как с увеличением пролета конструкций снижается экономическая эффективность применения железобетона. Для этого инженеры разработали технологию предварительного напряжения стальной арматуры. Благодаря предварительно напрягаемой арматуре появилась возможность увеличивать пролеты, уменьшать поперечное сечение железобетонных конструкции. Данная научная работа направлена на изучение технологии напряжения стальной арматуры на бетон.

Материалы и методы. Материалы для исследования были получены из имеющихся научно-исследовательских книг, статей, журналов и блогах в сети интернет. Для написания статьи был использован метод контент-анализа документов. В исследовании планируется найти информацию по технологии пост-напряжения. Объект исследования – предварительное напряжение стального каната на бетон.

Результаты исследования. Благодаря проведенным исследованиям были получены данные об истории возникновения технологии напряженной арматуры, проанализированы преимущества и недостатки пост-напряженного армирования.

Обсуждение и заключение. После проведения исследования были получены данные о технологии напряжения стальной арматуры на бетон, рассмотрено применение технологии в России при строительстве промышленных и гражданских объектов. При использовании этой технологии появляется возможность увеличения пролетов и уменьшения поперечного сечения железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетон, преднапряжение, пост-напряжение, канатная арматура, стальной стержень, пластина, каналообразователь, оболочка, тяжной анкер, сцепление бетона.

Для цитирования. Технология пост-напряженного армирования железобетонных конструкций / Д. И. Борисов, М. В. Семенов, М. В. Письменсков, В. Н. Аксенов // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2023. — Т. 2, № 1. — С. 12–21. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-12-21

Original article

Technology of the Reinforced Concrete Structures Post-Tensioning

Dionisij I. Borisov, **Maksim V. Semenov**, **Michael V. Pismenskov**, **Vladimir N. Aksenov**

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉borisovdionisij@gmail.com

Abstract

Introduction. A large number of building materials is used for construction of buildings and structures, the reinforced concrete is being one of them. It has the leading position when choosing the material for construction of buildings and structures. However, like any other material, the reinforced concrete has its disadvantages: apart from considerable weight of the reinforced concrete structures, the impossibility to cover with them the large spans can also be referred to

disadvantages, as the increase of structures' spans impairs the economic efficiency of using the reinforced concrete. To handle this, engineers have developed the technology of steel reinforcement prestressing. Thanks to prestressed reinforcement, it has become possible to increase the spans and reduce the cross section of the reinforced concrete structures. This scientific paper investigates the technology of steel reinforcement post-tensioning.

Materials and Methods. The materials for the research were obtained from the available scientific editions, articles, journals and Internet blogs. The documents' content analysis method was used to write the article. In the course of the research, it is planned to find the information about the post-tensioning technology. The object of the study is the steel wire-rope post-tensioning.

Results. Thanks to the research, the data on the history of origin of the reinforcement prestressing technology was obtained and the advantages and disadvantages of post-tensioning were analysed.

Discussion and Conclusions. After the research, the data on the technology of steel reinforcement post-tensioning was obtained, the application of the technology in Russia in the construction of industrial and civil facilities was considered. This technology allows increasing the spans and reducing the cross section of the reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete, prestressing, post-tensioning, steel wire-rope reinforcement, steel rod, plate, ducttube, cable sheath, tendon anchor, concrete bonding.

For citation. D. I. Borisov, M. V. Semenov, M. V. Pismenskov, V. N. Aksenov. Technology of the Reinforced Concrete Structures Post-Tensioning. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2023, vol. 2, no. 1, pp. 12-21. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-12-21

Введение. В современном мире строительство зданий и сооружений играет важную роль. Благодаря этой отрасли обеспечивается комфортное существование современного общества. Безопасность здания (состояние строительных конструкций, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан) – одна из составляющих комфорта. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений разрабатываются, исследуются и применяются различные технологичные решения, которые не только повышают безопасность, но и являются экономически эффективными. Рассмотрено несколько таких решений, например, создание железобетона. Его использование помогает возводить чудеса инженерной изобретательности. Например, в Торонто возвели самое высокое в мире отдельно стоящее сооружение из железобетона высотой 555 м — телебашню. Ее сечение в виде трилистника является очень хорошим решением для применения технологии предварительного напряжения арматуры.

Предварительное напряжение — это приложение к конструкции сил, стремящихся сжать железобетонный элемент и придать ему обратный выгиб в ненагруженном состоянии. Обычно предварительное напряжение применяется при отсутствии противодействия изгибающим и растягивающим напряжениям, которые возникают в результате приложения нагрузок.

Предварительное напряжение на бетон играет важную роль в мостостроении и в строительстве промышленных зданий и сооружений. В настоящее время преднапряжение на бетон приобретает популярность в гражданском строительстве.

Цели данного научного исследования:

– изучение истории создания технологии предварительного напряжения;

– изучение методов и материалов, используемых при натяжении на бетон;

– изучение объектов, в которых применялась указанная технология.

Чтобы реализовать цели, потребовалось выполнить следующие задачи:

– собрать и проанализировать историческую информацию по технологии;

– сравнить выводы различных научных статей и книг;

– разработать предложения по популяризации технологии предварительного напряжения при строительстве гражданских объектов.

Материалы и методы. В настоящее время при использовании напряжения на бетон используется современная высокопрочная сталь. Однако требования к стали, используемой в напряжении, менялись на протяжении всего времени ее использования. В 1872 г. P. H. Jackson, инженер из г. Сан-Франциско, получил патент на пост-напряжение. Он вставил стальные стержни в блоки каменной кладки и напряг их с помощью резьбового устройства. Этому примеру последовал инженер из Германии C. W. Doehring, в 1888 г. он получил патент на предварительное напряжение плит с помощью металлической проволоки [2]. Так как сталь в то время имела низкий предел текучести, то первые попытки не увенчались успехом, и напряжение, создаваемое домкратом на проволоку в сочетании с высокой ползучестью и усадкой бетона, приводило к потере большей части усилия напряжения, приложенного к конструкции, в результате чего стальная преднапряженная проволока оказалась малоэффективной [1–3]. Начиная с 1926 г. по 1928 г. Eugene Freyssinet, инженер из Франции, изучал, как влияют долгосрочные потери напряжения при предварительном напряжении, и использовал новую высокопрочную сталь для успешного изготовления предварительно напряженных элементов во Франции. В 1940 г. он представил хорошо известную и широко принятую систему Freyssinet [4, 5], состоящую из конических клиновидных анкеров для 12 проволочных сухожилий (рис. 1). Разработки в области получения высокопрочной стали в сочетании с изобретением оборудования для предварительного напряжения стали еще одним важным прорывом в эффективном применении предварительного напряжения. Многие видные инженеры исследовали преднапряжение в бетоне, однако основное внимание в деятельности по предварительному напряжению уделялось мостостроению и специальным конструкциям.



а)



б)

Рис. 1. Раннее анкерное устройство Freyssinet: а) внутренний конус; б) узел крепления [1]

Только в начале 1950-х годов в США инженеры-новаторы пересмотрели применение предварительного напряжения для устранения трещин и уменьшения прогибов в тонких плоских плитах в зданиях [6, 7]. Хотя этим новаторам следует отдать должное за введение предварительного напряжения, основной инструмент проектирования для его применения был предложен T. Y. Lin в виде концепции «балансировки нагрузки».

В настоящее время технология пост-напряженного армирования широко используется в мире [8] (рис. 2).

Одним из первых инженеров, который начинал исследовать эту технологию в России, был В. В. Михайлов. В 1936 г. он предложил натянуть арматуру до ее предельных значений, после чего залить бетоном, выдержать до набора проектной прочности, а затем нагрузить ее до предельных расчетных значений. В результате при такой нагрузке конструкция должна работать так, что в растянутой зоне, где обычно появляются повреждения, трещины не будут раскрыты вплоть до исчерпания несущей проектной способности. Такая конструкция стала популярная настолько, что уже в 1960-х годах сборный предварительно напряженный железобетон производился в объеме более 30 млн. м^3 в год, и в то время этот показатель был значительно выше, чем в других странах [9, 10].

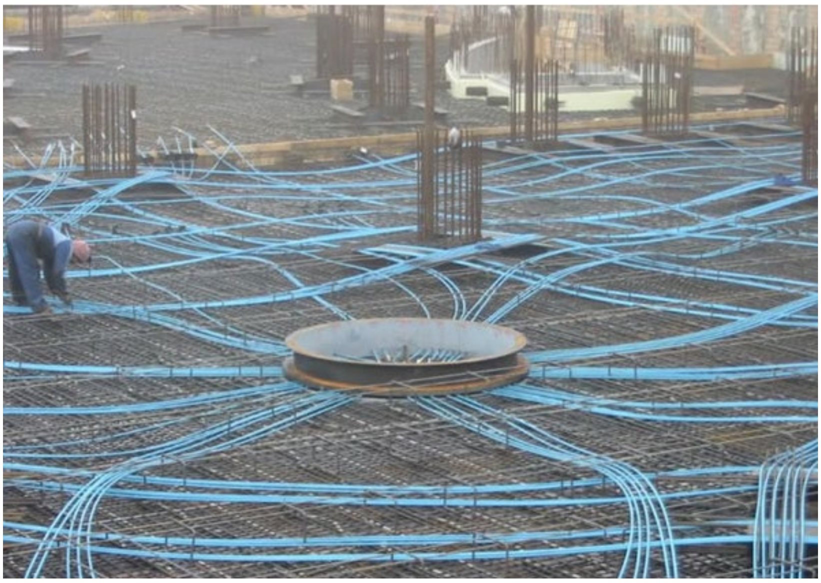


Рис. 2. Постнатяжение стальных прядей в трубе[1]

В России предварительное напряжение с натяжением на бетон широко применяется при строительстве путепроводов и мостов, но при строительстве гражданских зданий практически не применяется. Это обуславливается как дороговизной технологии и нехваткой высококвалифицированных специалистов, что увеличивает стоимость проектирования и монтажа, так и нехваткой научно-исследовательской литературы.

В основном технологию предварительного напряжения конструкций используют на строительной площадке. Элементы, которые необходимы для напряжения, прокладывают в трубках (каналообразователях). Эти трубки служат для скольжения каната (при натягивании его домкратами), защиты от внешних повреждений и противодействия возникновению ржавчины на поверхности стальных канатов. После прокладки канатов в трубки производится бетонирование конструкции (используемый бетон должен соответствовать требуемому проектному классу прочности). Как только бетон затвердел, то сталь внутри трубок подвергается напряжению с помощью гидравлических домкратов. После натяжения канаты фиксируют, а оставшееся пространство внутри трубок заполняют раствором (применяют жидкий цементный безусадочный раствор для защиты от коррозии и передачи усилий на кожуховый канал) и запрессовывают. Напрягающие элементы располагают так, чтобы стальные канаты работали в соответствии с заданными проектом условиями и режимом работы. Очередность установки напрягаемой и ненапрягаемой арматуры определяется как проектом, так и длиной самих напрягаемых элементов (длинные элементы устанавливаются после раскладки ненапрягаемой арматуры, короткие — вместе).

Так как пост-напряжение используется в серьезных конструкциях, то и к бетону, используемому в таких конструкциях, предъявляются специальные требования:

1) малая усадка (зависит от количества воды и добавок в бетоне, влажности воздуха, соприкасающегося с поверхностью бетона, и линейных размеров конструкции);

2) ползучесть бетона (зависит от прилагаемой нагрузки на проектируемую конструкцию, условий, создаваемых для набора прочности бетона, и размеров конструкции);

3) высокая прочность на сжатие (зависит от класса прочности бетона).

[1] Постнатяжение стальных прядей в трубе / LITEC // litec.org : [сайт]. URL: https://litec.org (дата обращения : 22.02.2023)

Все три параметра должны учитываться, так как малейшее отклонение от заданных проектом параметров станет причиной укорачивания (изменения геометрических параметров конструкции), что повлечет за собой уменьшение напряжения в стальных прядях и приведет к увеличению прогибов, раскрытию трещин. К стали, используемой в качестве напрягающего элемента, также предъявляются особые требования: условия температурной эксплуатации, характер нагружения конструкций, высокая прочность (чтобы выдерживать нагрузки натяжения), способность сцепления с бетоном достаточная, чтобы передавать усилия на раствор.

Каналообразователи (кожуховые каналы), внутрь которых прокладывается стальной канат, изготавливают как из прочной гофрированной пластмассы, так и из волнистой металлической жести. Материал требуется достаточно плотный и герметичный, чтобы внутрь канала ничего не попадало, например, при бетонировании не затекало «цементное молоко». Форму гофры и волны выбрали не случайно — такая форма способствует надежному сцеплению каналообразователя с бетоном проектируемой конструкции, не будет проскальзывать в теле бетона и будет обеспечивать передачу требуемых усилий от бетона на стальные канаты и наоборот (напряжение от арматуры на бетон). Также благодаря своей волнистой (гофрированной) форме появляется возможность использования специальных соединительных муфт: они плотно навинчиваются на концы, которые требуется состыковать. При монтаже длинных каналов устраиваются трубки, которые выводятся на поверхность монолитной конструкции. Это сделано для отвода воздуха, находящегося внутри канала, при подаче раствора.

Напряжение стальных элементов производится так, чтобы создаваемые усилия сжатия равномерно увеличивались по всему сечению бетона. Для этого разрабатывается специальная программа напряжения, следуя которой производится поочередное натяжение в соответствии с прописанной проектом последовательностью. Преднапряжение следует выполнять ступенчато. После достижения полного усилия проектного напряжения концы стержней удерживают в специально отведенных местах, в которых будет располагаться их анкеровка, далее кожуховые каналы запрессовываются раствором, который обеспечивает защиту каната. Для того, чтобы выполнялись условия защиты стали, необходимо быстро выполнять все этапы натяжения и запрессовки. Также требуется контролировать, чтобы температура бетона конструкции была не ниже +5 °С. Запрессовка производится насосом, который подает под небольшим давлением раствор — через специальное отверстие он медленно и равномерно подается в «кожуховый канал». Запрессовка считается завершенной, как только раствор начинает выходить из трубок воздухоотведения на противоположном конце каналообразователя.

В предварительном напряжении стальной арматуры на бетон приняты две схемы:

1) со сцеплением пост-напряженного армирования с бетоном;

2) без сцепления с бетоном.

Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки при применении на различных типах конструкций. Исходя из этого, инженеры выбирают для каждой конструкции подходящую схему.

1. Схема «со сцеплением с бетоном» — суть этой технологии заключается в том, что в железобетонной конструкции создается усилие сжатия вследствие напряжения стальной арматуры без специального покрытия, снабженной на концах анкерными приспособлениями. После прокладывания каната в кожуховые каналы подается безусадочный раствор. Схема устройства и расположения требуемых элементов для монтажа данной системы указана на рис. 3.

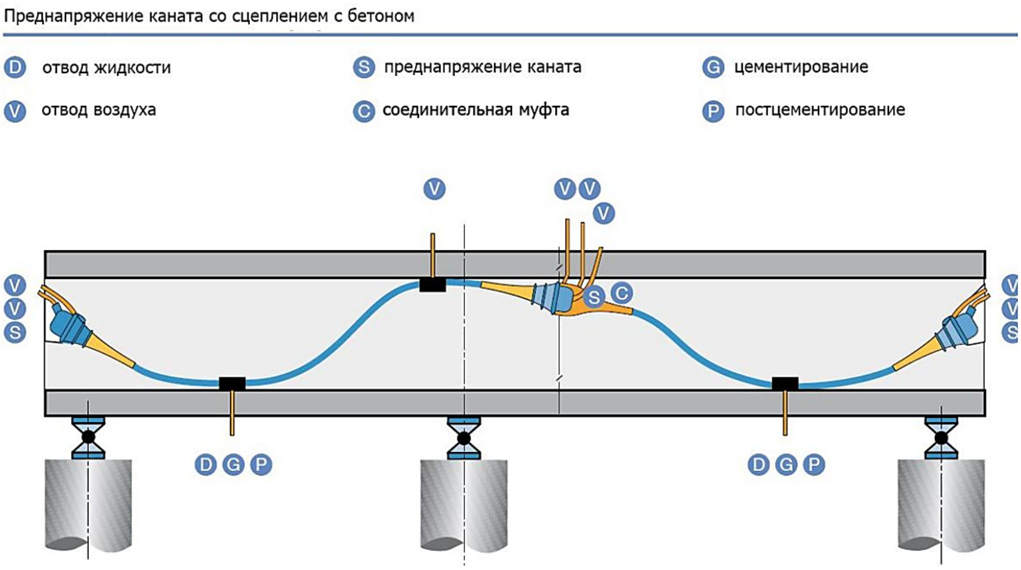


Рис. 3. Схема расположения требуемых элементов для монтажа технологии «со сцеплением с бетоном»[2]

Каналообразователи предназначены для формирования в железобетонной конструкции продольных и поперечных каналов (сквозных отверстий), в которые устанавливается высокопрочная арматура, подвергаемая натяжению. В дальнейшем гофрированный «кожуховый канал» будет обеспечивать требуемую защиту канатов и передачу усилий с канатов на бетон конструкции по всей длине каната [11].

В России эта технология используется при проектировании как мостовых конструкций, так и различных резервуаров и хранилищ. Например, компания ООО «СТС» выполнила проектную и рабочую документацию по обжатию стен силосных башен для хранения цемента в г. Сланцы в 2009 г. Была обеспечена поставка материалов и выполнение строительно-монтажных работ по технологии преднапряженного железобетона со сцеплением с бетоном (рис. 4).

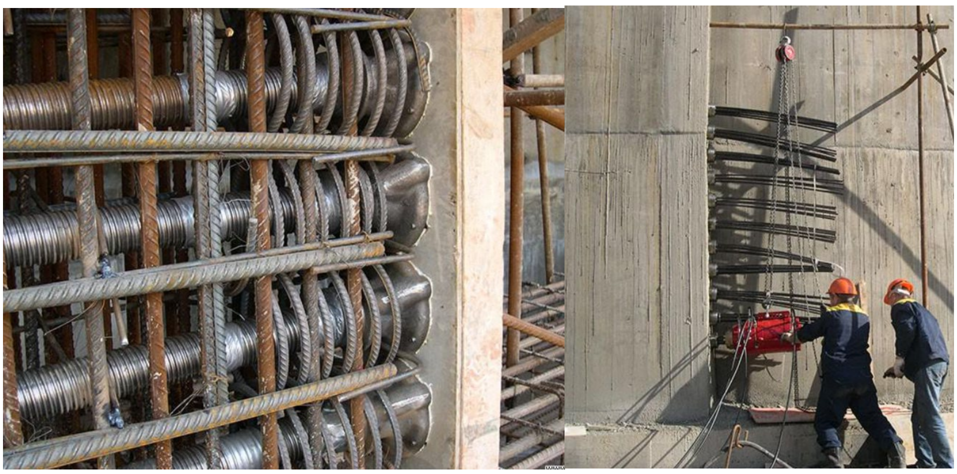


Рис. 4. Силосные хранилища цемента в г. Сланцы Ленинградской области[3]

2. Схема «без сцепления с бетоном» — эта система основана на создании в теле усилия сжатия за счет натяжения стального каната, покрытого непрерывной полимерной оболочкой. Каждая проволока стальной пряди

[2] Элементы систем преднапряжения со сцеплением / ПСК-Строитель // psk-stroitel.ru : [сайт]. URL: https://psk-stroitel.ru/tekhnologii/sistemy-predvaritelnogo-napryazheniya/so-stsepleniem.html (дата обращения : 20.02.2023)
[3] Силосные хранилища цемента в Сланцах / STS // sts-hydro.ru : [сайт]. URL: http://www.sts-hydro.ru/objects/silosa-slancy.html (дата обращения : 20.02.2023)

покрывается антикоррозионным и смазывающим составом, который обеспечивает защиту и правильную работу каната внутри оболочки. Раскладка такой системы осуществляется по заданной проектом траектории, которая описывает эпюру моментов конструкции. В данной технологии усилия натяжения от каната к конструкции (характерно для плит перекрытия) сообщаются через анкеры, установка которых производится на торцах конструкции. Анкеры подразделяют на две категории:

1) глухой анкер (закрепляют на торцах конструкции до бетонирования, при бетонировании замоноличивается вместе со всей конструкцией, после чего доступ к анкеру закрыт);

2) тяжной анкер (устанавливают после бетонирования и натяжения всего стального каната).

Внутри оболочки находится смазка, она позволяет уменьшить коэффициент трения каната о стенки оболочки. Защита каната такой оболочкой и смазкой позволяет защитить канат от воздействия агрессивной среды [13]. Схема расположения элементов указана на рис. 5.

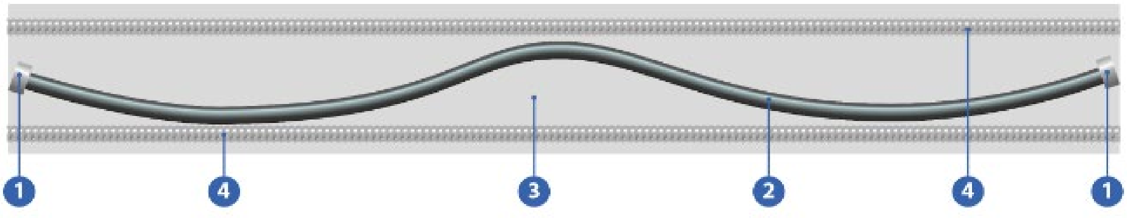


Рис. 5. Схема расположения требуемых элементов для монтажа технологии «без сцепления с бетоном»: 1) анкер; 2) канат в оболочке (монострендт); 3) бетон; 4) ненапрягаемая арматура[4]

В России также применяется технология натяжения на бетон без сцепления с арматурой. Например, компания ООО «СТС» разработала проектную и рабочую документацию, произвела поставку материалов, монтаж и натяжение всех необходимых компонентов высокопрочной арматуры системы преднапряжения без сцепления с бетоном для аэропорта Домодедово (рис. 6).

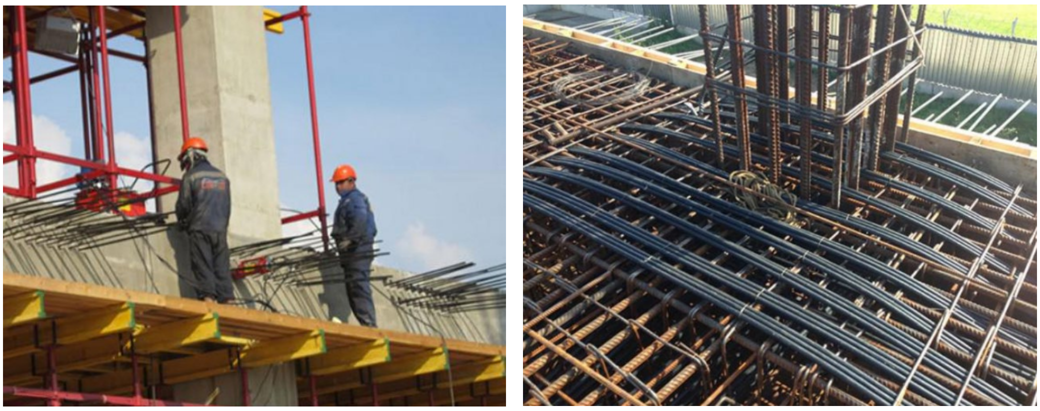


Рис. 6. Здание международного грузового терминала аэропорта Домодедово[5]

В гражданском строительстве система преднапряжения без сцепления с бетоном получила более широкое распространение, чем система со сцеплением.

[4] Схема расположения требуемых элементов для монтажа технологии «без сцепления с бетоном» / ПСК-Строитель // psk-stroitel.ru : [сайт]. URL: https://psk-stroitel.ru/tekhnologii/sistemy-predvaritelnogo-napryazheniya/so-stsepleniem.html (дата обращения : 20.02.2023)

[5] Притерминальная развязка аэропорта Домодедово / STS // sts-hydro.ru : [сайт]. URL: http://www.sts-hydro.ru/objects/silosa-slancy.html (дата обращения : 20.02.2023)

Огнестойкость преднапряженных конструкций обеспечивается так же, как и для конструкций без напряжения, то есть регулированием толщины защитного слоя бетона. Когда производится расчет на огнестойкость пост-напряженной конструкции, следует учесть то, что напряженный канат в пролете находится выше ненапрягаемой арматуры, следовательно, защитный слой напрягаемой арматуры будет складываться из защитного слоя ненапрягаемой арматуры и самой ее величины. Еще учитывается положение самого стального элемента в кожуховом канале, например, как правило, напрягаемый элемент в середине пролета находится чуть выше оси оболочки канала, а на опоре находится ниже оси канала. Для напрягаемой арматуры без сцепления с бетоном добавляется еще один плюс к защите стали от огня — он заключается в том, что сама напрягаемая арматура находится в смазке, которая закипает при температуре 200 °С, и в оболочке (плотная пластмасса уменьшает температуру на границе соприкосновения самой оболочки с бетоном [14].

Чтобы упростить расчет на огнестойкость, американским институтом пост-напряжения PTI были разработаны специальные таблицы, которые рекомендуют величины требуемых защитных слоев при использовании пост-напряженного армирования (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендации по толщинам перекрытий и защитных слоев бетона

Минимальные габариты	Расчетная продолжительность пожара, ч					
	0,5	1	1,5	2	3	4
Толщина перекрытия, мм	75	95	110	125	150	170
Защитный слой до ненапрягаемой арматуры, мм	20	20	25	35	45	55

Результаты исследования. Благодаря исследованию были получены знания истории возникновения технологии пост-напряжения, которая была запатентована в 1872 г. В последующие года многие инженеры стали следовать изучать эту технологию. В 1940 г. Eugene Freyssinet инженер из Франции продемонстрировал систему Freyssinet, которая используется по сей день. В России преднапряжение впервые использовал в 1936 г. В. В. Михайлов. Также мы узнали, что при производстве строительных работ с применением технологии наряженной арматуры используется бетон высокой прочности, высокопрочная арматура (трос), каналообразователи, специальный раствор и оборудование для выполнения натяжения. Выяснили, что существуют два метода предварительного напряжения с помощью стальной арматуры: 1) до заливки бетона (предварительное напряжение на упоры); 2) после заливки и набора бетоном прочности (пост-напряжение или предварительное напряжение на бетон). А в пост-напряжении существуют два способа натяжения: 1) со сцеплением каната с бетоном (чаще используется для напряжения в монолитных балках); 2) без сцепления каната с бетоном (имеет меньший диаметр каната по сравнению с первым вариантом, чаще используется для напряжения монолитных плит).

Обсуждения и заключение. В настоящей статье получены данные, которые описывают технологию предварительного напряжения стальной арматуры на бетон. Благодаря собранной информации были выделены преимущества и недостатки рассмотренной технологии.

Преимущества:

– уменьшается расход стали (используется арматура высокой прочности);

– повышается трещиностойкость конструкций;

– увеличивается жесткость, уменьшаются прогибы;

– повышается способность конструкции работать на выносливость, так как конструкция работает под воздействием многократно повторяющихся динамических нагрузок (от кранов, автотранспорта и т.п.);

– срок службы конструкции в агрессивных средах увеличивается, так как арматура меньше подвергается воздействию внешней среды;

– уменьшается расход бетона и снижается масса конструкций.

Недостатки:

– для выполнения работ по проектированию и монтажу конструкций по указанной технологии требуются высококвалифицированные кадры;

– увеличение стоимости строительства.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод. При использовании напряженной стальной арматуры можно использовать все положительные качества стали и бетона. Напрягаемый железобетон можно использовать для большепролетных конструкций — он более экономичный и высокопрочный, чем ненапрягаемый железобетон. Также повышенная трещинностойкость позволяет использовать преднапряженные конструкции в динамически нагруженных и агрессивных местах.

Пост-напряженное армирование используется в тех местах, где это является экономически эффективным, для зданий, где использование ненапряженного бетона и стали для обеспечения требуемой жесткости и прочности конструкции становится экономически невыгодным и нецелесообразным. Также ненапрягаемая конструкция тяжелее, чем напряженная, из-за этого на устройство фундамента требуется больше затрат. Так как у пост-напряженного армирования есть возможность увеличивать пролеты, то увеличивается объемно-планировочное внутреннее пространство, что позволит проектировать более свободные планировки.

Технология преднапряжения со сцеплением бетона с арматурой доказала свою эффективность при возведении массивных балочных конструкций и мостовых пролетов. В гражданских зданиях чаще применяется пост-напряжение без сцепления, в результате чего увеличивается пролет монолитных плит перекрытий и покрытий, а из-за меньшего сечения конструкций уменьшается вес здания.

Библиографический список

1. Aalami, B. O. Post-Tensioned Buildings: Design and Construction / Bijan O. Aalami — Adapt, 2014. — Pp. 400.

2. Кео, У. Исторические аспекты применения преднапряженного бетона в мировой и российской строительной индустрии / У. Кео, А. Н. Топилин // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2019. — № 1. — DOI: 10.15862/12SATS119

3. Асатрян, Л. В. Преднапряженный железобетон, история, применение, перспективы развития / Л. В. Асатрян // Технологии бетонов. — 2008. — № 1. — С. 74–75.

4. Fernández-Ordóñez, D. Eugène Freyssinet : "I was born a builder" / D. Fernández-Ordóñez // Technische Universität Dresden. Conference : 28. Dresdner Brückenbausymposium. — Dresden. Germany, 2018. — № 1. — Pp. 14–23.

5. Jartoux, P. The work of Eugène Freyssinet : The Most Significant Bridges of his Career / P. Jartoux — 2011. — Pp. 12.

6. Espion, B. Thin concrete shells by Eugène Freyssinet / B. Espion // Building Knowledge, Constructing Histories. — Université Libre de Bruxelles, 2018. — № 1. — Pp. 199–206.

7. Post-tensioning Manual 6th edition. PTI. — 2006. — № 1. — Pp. 34–65.

8. Szydłowski, R. Post-Tensioned Concrete Long-Span Slabs in Projects of Modern Building Construction / R. Szydłowski, J. Łabuzek. // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. — Vol. 245 (2). — 2017. — № 1. — Pp. 37–64. — DOI: 10.1088/1757-899X/245/2/022065.

9. Кирильчук, И. Б. Монолитный предварительно напряженный железобетон: история, применение, предпосылки развития / И. Б. Кирильчук // Строительство и архитектура». — 20018. — № 1. — С. 53–97.

10. Кохно, В. О. Актуальность применения предварительно напряженных железобетонных конструкций в российском гражданском строительстве / В. О. Кохно. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — № 3 (398). — С. 29–32.

11. Ратц, Е. М. Анализ и оптимизация работ по предварительному напряжению железобетонных защитных оболочек АЭС / Е. М. Ратц, И. Н. Хряпченкова // Строительство и архитектура — 2017. — № 1. — С. 98–119.

12. Mailyan, D. R. Planning of multilayer cylindrical wall reservoirs / D. R. Mailyan, E. V. Trufanova // International Conference of Industrial Engineering. — 2016. — Vol. 150. — Pp. 1926–1935. — DOI https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.193.

14. Кузнецов, В. С. Прочность изгибаемых железобетонных элементов с дополнительной высокопрочной арматурой без сцепления с бетоном / В. С. Кузнецов, Ю. А. Шапошникова // Строительство и архитектура — 2016. — № 1. — С. 23–86.

15. Портаев, Д. В. / Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий // Д. В. Портаев — Москва, 2011.

Поступила в редакцию 26.01.2022

Поступила после рецензирования 29.01.2022

Принята к публикации 02.02.2023

Об авторах:

Борисов Дионисий Игоревич — магистрант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, borisovdionisij@gmail.com

Семенов Максим Викторович — магистрант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, semnov.maksim@gmail.com

Письменсков Михаил Владимирович — магистрант кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, PismenskovM@yandex.ru

Аксенов Владимир Николаевич — доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, Aksenov.v.n@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Д. И. Борисов — сбор и анализ научной информации, подготовка текста, формирование выводов; М. В. Семенов — анализ научной информации, редактирование текста; М. В. Письменсков – подготовка научных материалов, редактирование текста; В. Н. Аксенов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.